第 39 卷 第 6 期
2022 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 6
Dec. 2022

文章编号:1000-4939(2022)06-1185-08

竖向近断层地震动下 QZSID 隔震系统的地震响应

卢晓峰[1],刘阳[2]

(1. 扬州工业职业技术学院,225127 扬州;2. 同济大学土木工程学院,200092 上海)

摘　要:采用准零刚度、阻尼器和惯容器并联组合形成一种新的混合隔震系统 QZSID。为研究竖向近断层地震动下 QZSID 隔震系统的动力反应机理,建立了竖向地震下 QZSID 系统的分析模型。采用非线性时程反应分析方法分析了 QZSID 隔震系统的响应控制效果。研究结果表明惯容器的地震响应控制效果与近断层地震动的卓越周期相关;惯容器对长周期近断层地震动的加速度控制效果较好,但对位移控制效果较差;对于长周期地震波作用下虽然共振周期没有延长,但系统能避开结构地震波的共振频率,因此系统仍能获得良好的减震效果;系统的竖向自振周期不宜取值过大;阻尼比及竖向静态平衡点高度参数能有助于系统的位移响应控制,惯容器质量大小与地震响应数值不成比例关系,应考虑近断层地震动波频谱特性。

关键词:竖向近断层地震动;QZSID 隔震系统;地震响应控制

中图分类号:TU311.3　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.020

Seismic performance of QZSID isolation system under near-fault vertical earthquakes

LU Xiaofeng[1], LIU Yang[2]

(1. Yangzhou Polytechnic Institute, 225127 Yangzhou, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

Abstract: The QZSID system consisting of parallel Quasi-Zero-Stiffness (QZS), damper and inerter is studied. In order to study the dynamic response mechanism of QZSID isolation system under near-fault vertical earthquake, an analysis model of QZSID system under vertical earthquake is established. The response control effect of QZSID isolation system is analyzed by nonlinear time-history response. The results show that the seismic response control effect of inerter is related to predominant period of near-fault vertical earthquakes. The inerter has a good control effect on the acceleration of long-period near-fault earthquakes. However, there is a poor control effect on the displacement. Although the resonance period is not prolonged under the action of long-period ground motion, the system can avoid the resonance frequency of ground motion. The system can still obtain good isolation effect. The vertical natural vibration period of the

收稿日期:2021-02-27　　**修回日期:**2022-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51508414)

通信作者:刘阳,高级工程师。E-mail:winner5299@163.com

引用格式:卢晓峰,刘阳. 竖向近断层地震动下 QZSID 隔震系统的地震响应[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1185-1192.
LU Xiaofeng, LIU Yang. Seismic performance of QZSID isolation system under near-fault vertical earthquakes[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6):1185-1192.

system should not be too large. The damping ratio and static equilibrium height can be helpful to the seismic response control of the system. Seismic responses are not proportioned to the mass parameters of inerter. The isolation effect of the inerter is related to the characteristics of ground motions.

Key words: near-fault vertical ground motion; QZSID isolation system; seismic response control

基础隔震技术作为一种非常有效的振动控制措施,在实际工程中得到广泛应用并已经用于真实地震检验[1]。随着人们对地震动研究的深入,竖向地震的隔震问题引起了关注。Furukawa 等[2]通过振动台试验研究揭示,竖向地震作用下水平基础隔震结构也易遭受竖向地震的损害,因此,有必要进行竖向地震动的响应控制研究。

近年来,一些学者对竖向地震下的隔震结构性能进行了研究,提出了液压空气弹簧系统等进行竖向隔震控制,并应用于东京一所三层钢筋混凝土公寓建筑中,这也是日本首栋三维隔震民用建筑[3],但是由于造价过大都很难在工程中得到大量应用。与传统的隔震机制不同,最早由 Alabuzhev 等[4]提出的准零刚度概念具有低动态刚度、高静态刚度的特性。周颖等[5]基于准零刚度的原理,提出将并联碟形弹簧和线性压缩弹簧的准零刚度系统用于建筑结构竖向隔振。宋春芳等[6]基于正负刚度并联原理,通过碟形弹簧与螺旋弹簧并联,设计了压杆式准零刚度元件,并构建了一种准零刚度隔震床。在静平衡位置处的动刚度为零,满足系统低静位移和低固有频率的特性,在传统隔震理念的基础上为土木工程领域减震控制提供了新的解决方案。尽管准零刚度(quasi-zero-stiffness,QZS)概念开始在土木工程领域中应用,但由于竖向近断层地震动类似于水平地震一样,具有长周期脉冲效应,在该地震作用下的隔震结构响应显然与常规地震有所差异。为了改善隔震结构的地震可恢复性,采用增大阻尼、附加 TMD 的混合控制策略成为一个重要的研究方向[7-8]。近年来,惯容器作为一种新型阻尼器结合水平基础隔震技术得到了学者的关注。Smith 等[9]首次提出惯容概念,Pradono 等[10]首次将惯容器应用于隔震结构体系,De 等[11]对基础隔震层采用惯容器进行减震控制。尽管目前在惯容器水平减震方面取得了一定研究进展,但基于惯容器的竖向地震响应控制还鲜有报道,尤其是针对近断层竖向地震的研究还不充分。

本研究针对以上问题,开展竖向近断层地震动下的 QZSID 系统的减震控制机理研究,包括:QZSID 的减震机理分析;QZSID 的参数及地震波特性对减震效率的影响。

1 QZSID 系统动力模型及运动方程

1.1 隔震系统模型

采用竖向准零刚度系统(QZS)、惯容器(inerier)、线性阻尼器(damper)对结构系统进行竖向近断层地震动响应控制。其中,竖向准零刚度是由竖向负刚度元件和正刚度元件组合而成从而实现在某一位置或某一区域出现竖向总刚度近似为零的隔震系统。竖向负刚度由斜向的支撑弹性元件运动到一定位置时产生,由于在竖向静力作用下竖向刚度随斜向夹角变化,因此该系统为几何非线性变化系统,刚度与位移相关,且为非线性关系。图 1 所示为典型的系统示意图。其中:u 为质量块相对于固定端的竖向位移;L 为支撑的长度;h 为高度;θ 为支撑与水平线的夹角,当运动至水平时,即夹角为 0 时,此时斜向支撑的长度变为 a。该模型的恢复力表达式如下[12]。

$$F=2k\left(L-\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}\right)\frac{(h_0-u)}{\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}}+k_v u \tag{1}$$

式中:k_v 为竖向附加刚度;k 为斜向弹簧元件的刚度。

惯容器可实现的方法较多,但本质是惯性力放大效应,即质量较小的元件,可能实现几倍甚至几百倍于惯容器本身质量的表观质量。惯性作用力可以表示成两端具有不同加速度质量元件,其数学模型表示为

$$F_d=b(\ddot{u}_2-\ddot{u}_1) \tag{2}$$

式中:b 为表观质量;$\ddot{u}_1$、$\ddot{u}_2$ 为两端的加速度。

惯容器可配置在竖向支撑元件的下部区域,不参与静态承载。QZS 和 ID 同时使用时,惯容器与阻尼器并联使用,则整个隔震系统由 QZS、惯容器(inerier)和阻尼器(damper)组成,简称为 QZSID 系统,如图 1 所示。

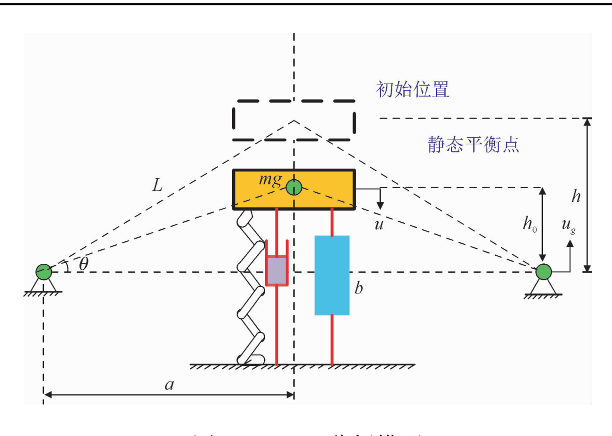


图 1　QZSID 分析模型

Fig. 1　Model of QZSID

1.2　系统动力方程

如图 1 所示，建立 QZSID 系统的质点模型，假定 u 为隔震结构的竖向变形，m 为隔震结构的质量，b 为惯容器的表观质量。假设 h_0 为静力平衡点，系统在静力平衡点上下振动，在竖向地震作用下根据动力平衡关系建立如下方程。

$$m\ddot{u}+2k\left(L-\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}\right)\frac{(h_0-u)}{\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}}+k_{\mathrm{v}}u+c\dot{u}+F_{\mathrm{d}}=-m\ddot{u}_g+mg \tag{3}$$

$$F_{\mathrm{d}}=b\ddot{u} \tag{4}$$

式中 c 为隔震结构的竖向阻尼系数。

在静载作用下，假设不考虑惯容阻尼器对静力承载的贡献，系统由初始状态达到静态平衡时的静载平衡方程为

$$2k\left(L-\sqrt{a^2+h_0^2}\right)\frac{h_0}{\sqrt{a^2+h_0^2}}=mg \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)，可以得到

$$m\ddot{u}+2k\left(L-\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}\right)\frac{(h_0-u)}{\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}}+k_{\mathrm{v}}u-2k\left(L-\sqrt{a^2+h_0^2}\right)\frac{h_0}{\sqrt{a^2+h_0^2}}+c\dot{u}+F_{\mathrm{d}}=-m\ddot{u}_g \tag{6}$$

为便于分析，定义如下参数。

$$\mu=b/m \tag{7}$$

$$\omega^2=\frac{k_{\mathrm{v}}}{m} \tag{8}$$

$$\xi=\frac{c}{2m\omega_{\mathrm{v}}} \tag{9}$$

$$\beta=\frac{k}{k_{\mathrm{v}}} \tag{10}$$

$$\gamma=\frac{a}{L} \tag{11}$$

式中：ω、ξ 为结构附加 QZS 的竖向自振频率和附加阻尼比。

将式(7)～(11)代入式(6)，并将式(6)两边同时除以 m，式(6)可以改写为

$$(1+\mu)\ddot{u}+2\omega^2\beta\left(L-\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}\right)\cdot\frac{(h_0-u)}{\sqrt{a^2+(h_0-u)^2}}+\omega^2u+2\omega\xi-2\omega^2\beta\cdot\left(L-\sqrt{a^2+h_0^2}\right)\frac{h_0}{\sqrt{a^2+h_0^2}}=-\ddot{u}_g \tag{12}$$

式(12)为非线性动力方程，采用龙格库塔数值分析方法求解。

2　地震波选取

近断层地震动波选波原则为：①矩震级为 6.0～7.6；②近断层间距小于 10 km；③覆土厚度 30 m，平均剪切波速 $v_{30}>200$ m/s，近似对应于Ⅱ类场地。近断层地震动计算时，按 8 度罕遇地震进行分析，所有地震动的加速度峰值均调幅为 0.4g。表 1 为所选的脉冲型地震波，所选取的范围涵盖 0～9 s 的脉冲周期，脉冲周期 T_P 采用等效速度谱对应的小波周期[13]，并根据脉冲周期大小从小到大依次选取 4 条地震波。图 2 所示为所选地震波的位移反应谱。

表 1　地震波信息表

Tab. 1　Earthquake records used in the simulations

编号	地震名称	记录台站	PGV/(cm · s^{-1})	时间间隔/s	持时/s	脉冲周期/s
N1	Imperial, Valley, 1979	El Centro#5	39	0.005	39.325	1.84
N2	Tabas, Iran, 1978	Tabas	40	0.020	33	3.08
N3	Chi-Chi, Taiwan, 1999	TCU052	144	0.005	90	7.19
N4	Chi-Chi, Taiwan, 1999	TCU068	213	0.005	90	8.73

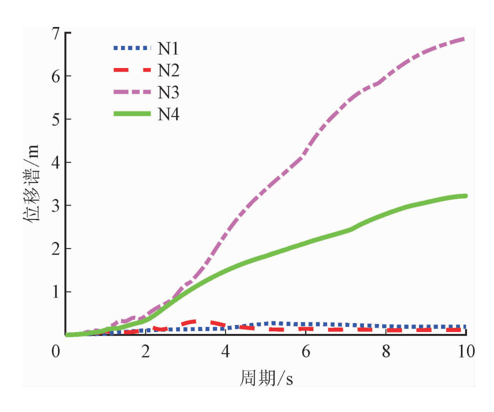


图 2 地震波位移反应谱

Fig. 2 Displacement spectrum for vertical near-fault earthquakes

3 分析模型参数选取

对于 QZSID 隔震系统的支撑长度参数 $L=0.5$ m，当系统在荷载作用下，作用至水平位置时系统的刚度为 0，即为理论上的准零刚度，此时的系统参数满足：$\gamma=\frac{2\beta}{2\beta+1}$ [12]，当支撑与水平线的夹角为 30°时，$\gamma=0.87$，$\beta=3.36$。支撑杆的轴向变形为：$z_b=L-\sqrt{a^2+(h-x)^2}=\left(1-\sqrt{\gamma^2+\left(\sqrt{1-\gamma^2}-\frac{x}{L}\right)^2}\right)L$ ($\gamma=\cos\theta$)，当质量块运动于近似水平位置，则轴向变形近似表达为 $z_b\approx(1-\cos\theta)L$，若角度较大时，轴向变形需求较高，应控制角度不宜过大，因此本研究选择 30°进行分析，但实际工程可根据具体工程条件进行定量优选角度。

4 QZSID 系统频谱特性及减震机理分析

4.1 简谐波激励

采用简谐激励 $A\cos(\omega t)$（A 为加速度幅值，ω 为激励频率）作为输入对系统进行分析，其中加速度反应放大系数 AAC（acceleration amplifcation coefcient）定义为响应峰值/输入峰值。图 3 所示为不同静态平衡点高度 h_0 对结构弹性恢复力曲线影响。由图可知，随着静态平衡点高度的改变体系准零刚度位置及曲线形态发生变化。一般情况下随着静态平衡点高度的增加，在位移为零点的位置准零刚度会变化为非准零刚度形态，该准零刚度变化形态与文献[5,12]的分析形态较为接近。图 4 所示为不同阻尼比 ξ 对结构滞回曲线影响。由图可知，当阻尼比增加时曲线形态发生变化，由于阻尼比增加使曲线由硬化状态演变为无硬化形态，曲线更加圆润，耗能能力及位移控制能力增强。

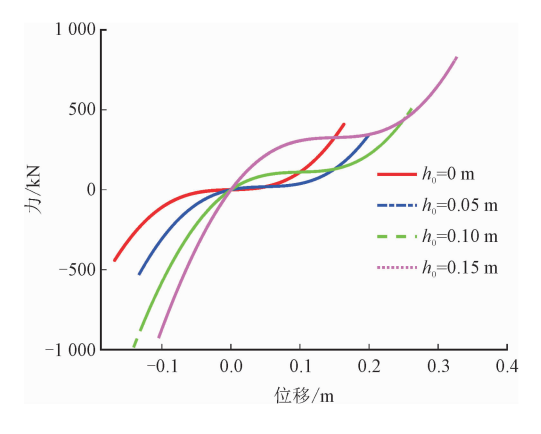


图 3 不同静态平衡点高度 h_0 时弹性恢复力曲线对比（$T=1$ s，$\xi=0.05$，$\mu=0.5$）

Fig. 3 Dynamic property comparison of elastic resilience curve for different h_0 ($T=1$ s, $\xi=0.05$, $\mu=0.5$)

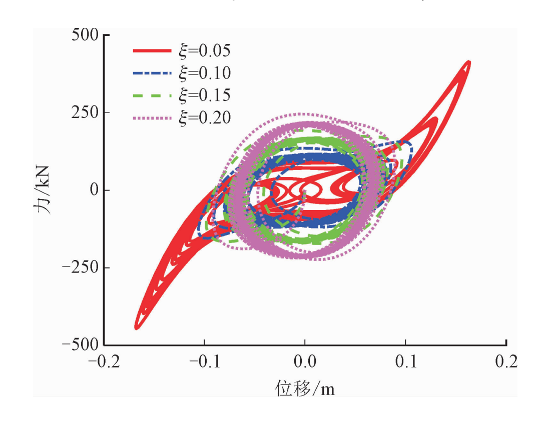


图 4 不同阻尼比 ξ 时滞回曲线对比（$T=1$ s，$h_0=0$ m，$\mu=0.5$）

Fig. 4 Hysteretic curve comparison ofelastic resilience curve for different ξ ($T=1$ s, $h_0=0$ m, $\mu=0.5$)

如图 5 所示，不同质量比 μ、不同激励频率作下 QZSID 的加速度和位移反应，其中位移反应指时间历程反应的绝对值的最大值。质量比 μ 表达为惯容器表观质量与结构质量之比，虽然其能产生较大表观质量，但实际中惯容器表观质量越大造价越高，从经济角度取值上限不宜过大，本分析中，上限值为 2。惯容器表观质量与系统的总质量比 μ 选取 4 种工况，分别是 $\mu=0,0.5,1.0,2.0$，简谐激励的频率 ω 范围为 0 ~ 2 rad/s，准零刚度参数 $L=0.5$ m，$\beta=3.36$，$\gamma=0.87$，隔震结构竖向自振周期 $T=2\pi/\omega=$

1 s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m。

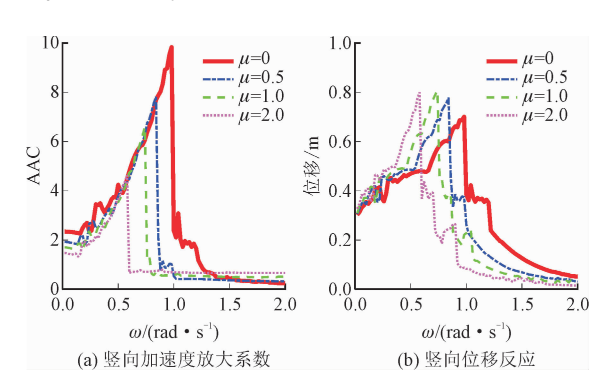


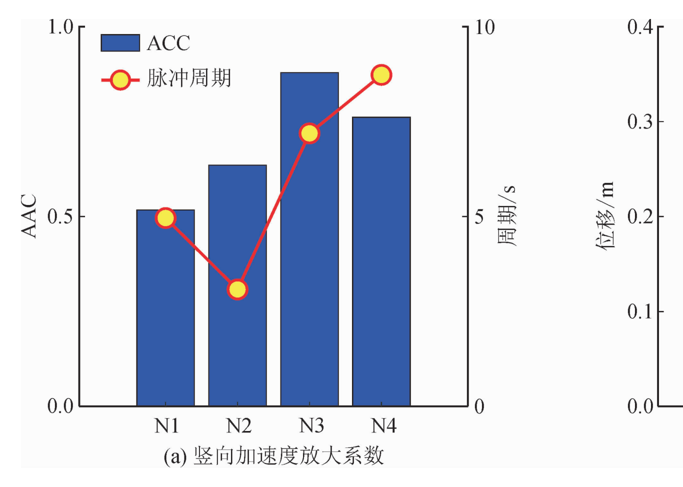
图 5　简谐激励响应($T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m)

Fig. 5　Responses of QZSID under harmonic excitation ($T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m)

由图可知，增加质量比能使共振频率减小，即可以使系统的振动周期得到延长以避开高频振动。由图 5(a)可知，对于加速度的控制作用特别是低频激励对应的加速度，需要注意惯容器的减震效果会受激励频谱特性影响较大，甚至可能出现放大加速度反应的可能。由图 5(b)可知，系统对于高频激励对应的位移反应有抑制效果，但由于惯容器具有延长调谐系统周期的作用，如果激励频率较小时，亦有可能造成位移放大。由于参数设计时需要避开加速度峰值或位移峰值所对应结构的频率进行振动控制，因此有必要分析提取响应峰值对应频率。从简谐激励分析可知，$\mu=0, 0.5, 1.0, 2.0$ 时系统的共振频率为 0.15 Hz、0.13 Hz、0.12 Hz、0.09 Hz。

4.2　地震波激励

输入实际地震波进行地震响应分析，首先分析脉冲型地震的脉冲周期与减震性能之间的关系，图 6 是脉冲周期与地震响应的比较示意图。由图可知，虽然脉冲周期在一定程度上可以反映地震响应的大致变化趋势，如随脉冲周期增大地震响应增大，但具体到实际地震波的情况，并不能完全表征近断层地震动的特征，与地震响应之间没有较强的正相关；例如 N1 与 N2 虽然脉冲周期不同，但位移响应却较为接近。



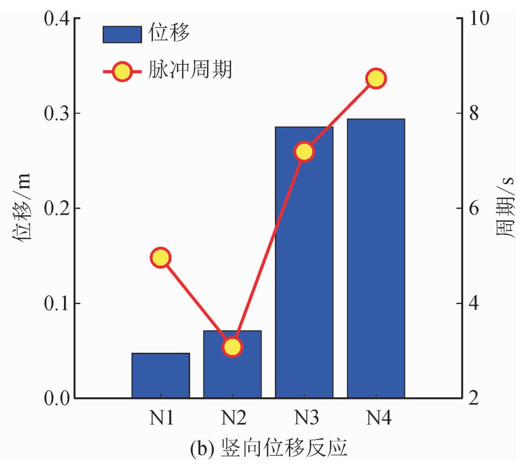


图 6　脉冲周期与地震响应的关系图($T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m)

Fig. 6　Relationship of pulse period and seismic responses($T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m)

如图 7～8 所示，不同质量比下 QZSID 的地震波输入傅里叶谱与加速度地震响应的傅里叶谱比较，限于篇幅仅分析 2 条波的工况。分析中惯容器与系统的总质量比 μ 选取 2 种工况，分别为 0、0.5，准零刚度参数 $L=0.5$ m, $\beta=3.36$, $\gamma=0.87$，隔震结构竖向自振周期 $T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m。对于卓越频率高的地震波作用下，如图 7 所示，地震波的卓越频率为 5.60 Hz，$\mu=0$，0.5 对应的地震加速度响应的卓越频率分别为 0.45 Hz、0.45 Hz（文中卓越频率指傅里叶谱峰值对应的数值）；系统通过延长周期从而产生共振，避开地震波的卓越频率；对于卓越频率短、长周期特性显著的地震波作用下，如图 8 所示，地震波的卓越频率为 0.30 Hz，$\mu=0$，0.5 对应的地震加速度响应的卓越频率分别为 0.30 Hz、0.30 Hz，会激发长周期共振，但大于结构系统的共振频率，结构的自振频率避开了地震波卓越频率，因此仍然具有良好的减震效果。

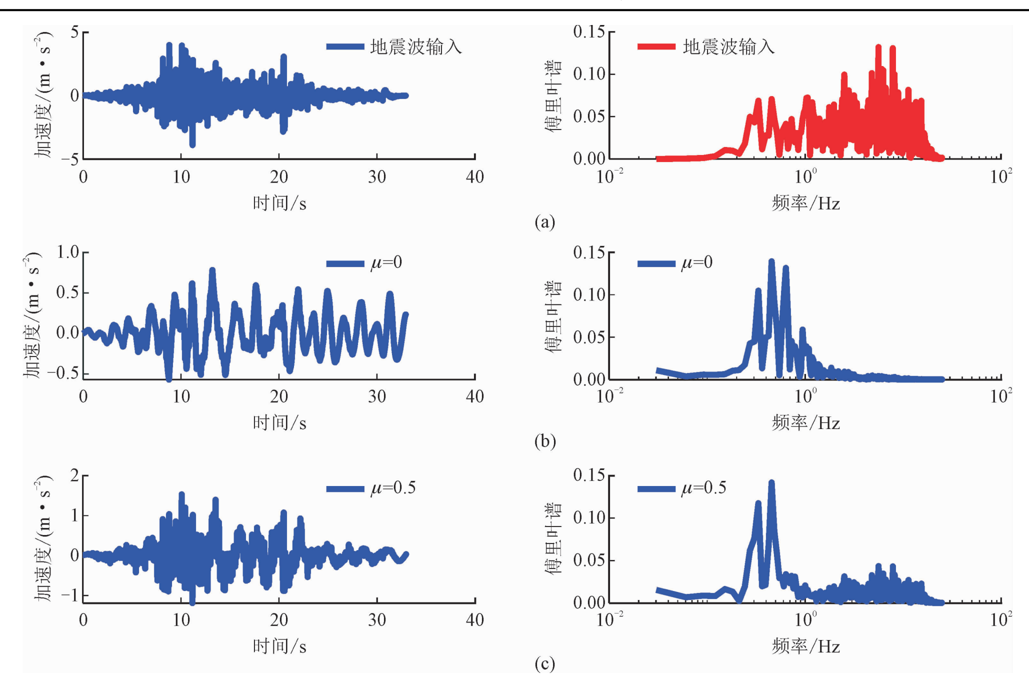


图7 傅里叶谱(Tabas)

Fig. 7 Fourier spectrum (Tabas)

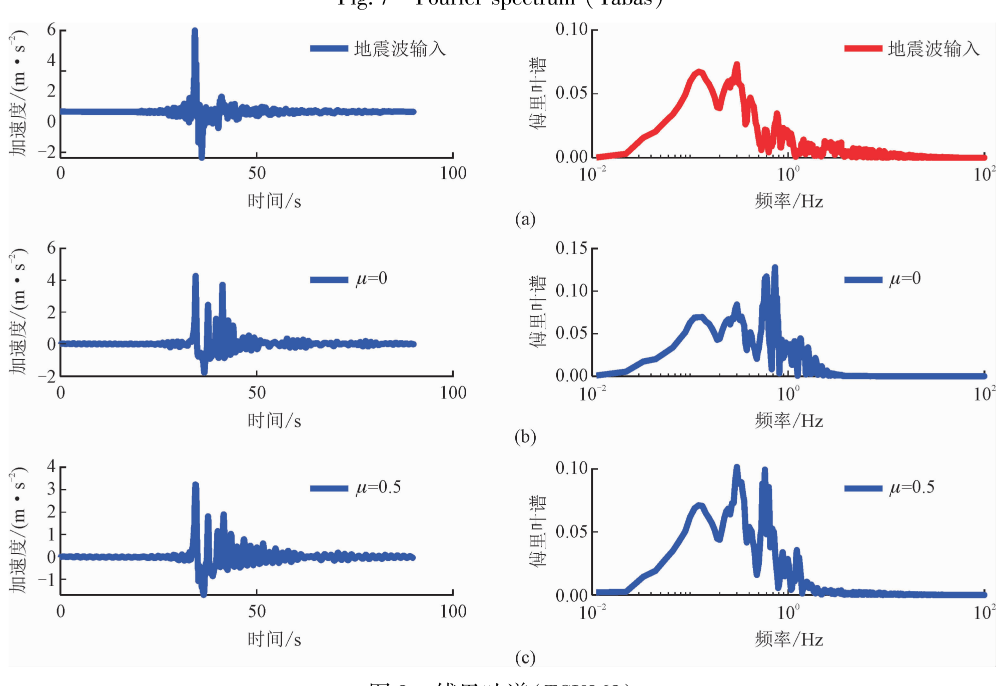


图8 傅里叶谱(TCU068)

Fig. 8 Fourier spectrum (TCU068)

5 QZSID 系统参数分析

5.1 质量比 μ

图9为不同质量比 μ 时4条地震波作用下近断层地震动作用下QZSID的加速度和位移反应。分析中 μ 分析范围为[0,2],准零刚度参数 $L=0.5$ m, $\beta=3.36$, $\gamma=0.87$;隔震结构的竖向自振周期 $T=1$ s, $\xi=0.05$, $h_0=0.10$ m。由图可知,不同质量比 μ 对结构的竖向加速度放大系数及竖向位移均影响较大,通过选择合理的 μ,可实现地震响应的控制,理想状态如图中所示,当 $\mu=1.0$ 时4条地震波作用下可使加速度放大系数均小于1,即可获得良好的隔震效应;同时随着质量比的增加,卓越周期较短的地震波对应的竖向位移能够得到降低,说明惯容器对

近断层地震动的位移反应能进行一定的控制，但应考虑地震波的卓越振动周期。

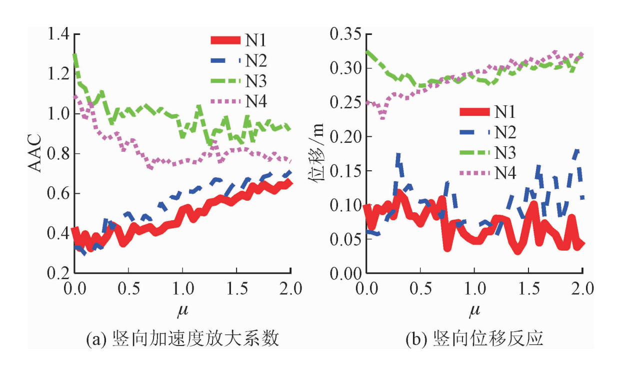


图 9　不同质量比 μ 下地震响应

（$T=1$ s，$\xi=0.05$，$h_0=0.10$ m）

Fig. 9　Seismic responses for different μ

（$T=1$ s，$\xi=0.05$，$h_0=0.10$ m）

5.2　竖向隔震周期 T

如图 10 所示，为不同竖向周期 T 时近断层地震动作用下 QZSID 的地震响应。系统的竖向隔震周期 T 分析范围为[0.5，3] s，准零刚度参数 $L=0.5$ m，$\beta=3.36$，$\gamma=0.87$，隔震结构竖向自振周期 $\xi=0.05$，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$。由图可知，随着竖向自振周期 T 的增加，卓越周期较长的地震波对应的竖向加速度放大系数及竖向位移均呈现放大趋势，因此竖向自振周期 T 选取不应过大。竖向自振周期 T 对卓越周期较短的地震波作用下的加速度响应影响不显著。

5.3　阻尼比 ξ

图 11 为不同阻尼比 ξ 时近断层地震动作用下 QZSID 的地震响应。分析中考虑常规阻尼器的贡献及成本，阻尼比上限设置为 0.3，因此阻尼比 ξ 分析范围为[0.05，0.30]，准零刚度参数 $L=0.5$ m，$\beta=3.36$，$\gamma=0.87$，隔震结构的竖向自振周期 $T=1$ s，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$。由图可知，增加阻尼比可使 N3、N4 地震作用下结构的竖向加速度放大系数有所降低，但对于 N1、N2 作用下的地震响应降低则并不显著。阻尼比增加对位移控制具有明显效果。

5.4　竖向静态平衡点 h_0

图 12 为不同静态平衡点高度 h_0 时近断层地震动作用下 QZSID 的地震响应。h_0 分析范围为[0，0.20] m，准零刚度参数 $L=0.5$ m，$\beta=3.36$，$\gamma=0.87$，隔震结构竖向自振周期 $T=1$ s，$\xi=0.10$，$\mu=0.5$。由图可知，N1、N2 地震波作用下加速度地震响应随着 h_0 增大，加速度有所增加，例如在 $h_0=0.06$ m 时，所有地震波作用下结构的加速度放大系数均小于 1；随着 h_0 的增加，4 条地震波作用下的位移反应均有所降低，说明适当增大 h_0 可在不影响加速度减震效应的情况下有效控制位移响应。

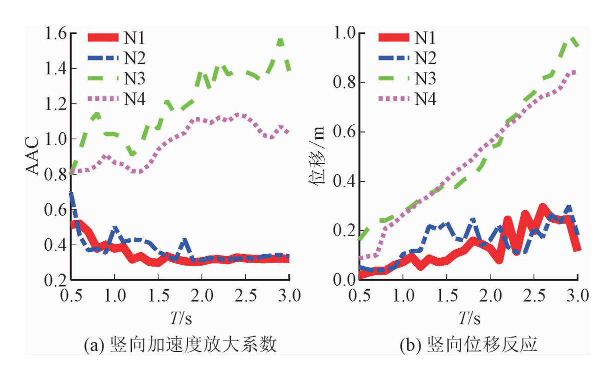


图 10　不同竖向自振周期 T 下地震响应

（$\xi=0.05$，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$）

Fig. 10　Seismic responses for different T

（$\xi=0.05$，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$）

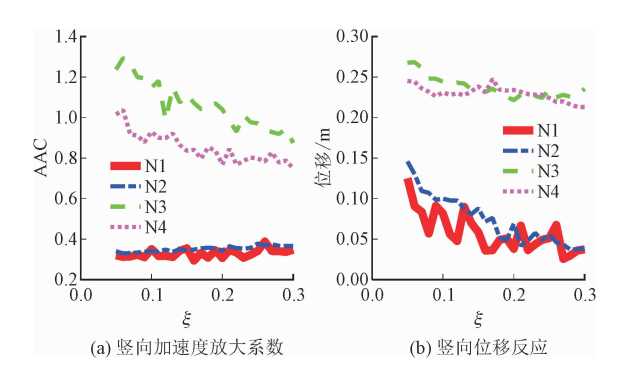


图 11　不同阻尼比 ξ 下地震响应

（$T=1$ s，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$）

Fig. 11　Seismic responses for different ξ

（$T=1$ s，$h_0=0.05$ m，$\mu=0.5$）

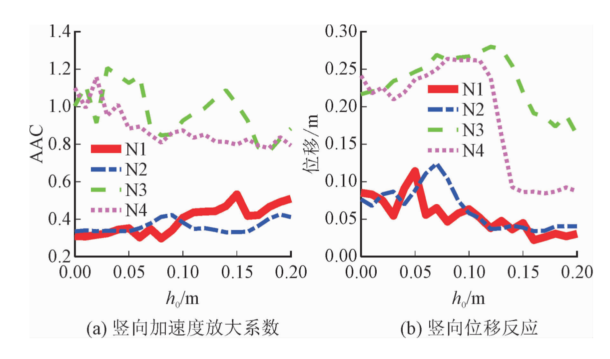


图 12　不同 h_0 下地震响应（$T=1$ s，$\xi=0.10$，$\mu=0.5$）

Fig. 12　Seismic responses for different h_0

（$T=1$ s，$\xi=0.10$，$\mu=0.5$）

6 结 论

通过对 QZSID 进行地震响应控制研究,得到如下结论。

1)对于卓越周期或脉冲周期较大(但不与系统共振,文中分析的脉冲周期约在 9 s 以内)的近断层地震动,QZSID 通过一定的参数设计可以实现对地震响应的控制,惯容器的调谐作用对位移的控制会呈现放大效应,需依靠增加阻尼等措施予以控制;对于卓越周期或脉冲周期相对较小的的近断层地震动,则能够使 QZSID 实现加速度和位移的双控效果。

2)对于卓越周期或脉冲周期较大(但不与系统共振,文中分析的脉冲周期约在 9 s 以内)的近断层地震动,可通过增加惯容器表观质量来实现对加速度及位移的控制,通过阻尼比的增加可控制竖向位移反应。同时考虑近断层地震动波特性,竖向振动周期不宜取值过大,选取合适的静态平衡点位置可实现对位移的有效控制。

参考文献:

[1] SATISH N, SUN X H. Response of base-isolated USC hospital building in Northridge earthquake[J]. Journal of structural engineering,2000,126(10):1177-1186.

[2] FURUKAWA S,SATO E,SHI Y D,et al. Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2013, 42(13):1931-1949.

[3] TOMIZAWA T,TAKAHASHI O,SUHARA J,et al. Vibration test in a building named "Chisuikan" using three-dimensional seismic isolation system[C]//Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon,Portugal:IAEE,2012.

[4] ALABUZHEV P,GRITCHIN A,KIM L,et al. Vibration protecting and measuring systems with quasi-zero stiffness[M]. Florida:CRC Press,1989.

[5] 周颖,陈鹏. 基于准零刚度特性的结构竖向隔振系统研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(4):143-150.
ZHOU Ying,CHEN Peng. Investigation on a vertical isolation system with quasi-zero stiffness for building structures[J]. Journal of building structures,2019,40(4):143-150(in Chinese).

[6] 宋春芳,顾黄森,刘彦琦,等. 准零刚度隔振床静态特性分析[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2127-2133.
SONG Chunfang,GU Huangsen,LIU Yanqi,et al. Static analysis of quasi-zero stiffness vibration isolation bed[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(5):2127-2133(in Chinese).

[7] TSAI H C. The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures[J]. International journal of solids and structures,1995,32(8/9):1195-1210.

[8] LIU Y H,WU J B,DONÀ M. Effectiveness of fluid-viscous dampers for improved seismic performance of inter-storey isolated buildings[J]. Engineering structures,2018,169:276-292.

[9] SMITH M C. Synthesis of mechanical networks:The inerter[J]. IEEE transactions on automatic control,2002,47(10):1648-1662.

[10] PRADONO M H,IEMURA H,IGARASHI A,et al. Application of angular-mass dampers to base-isolated benchmark building[J]. Structural control and health monitoring,2008,15(5):737-745.

[11] DE DOMENICO D,RICCIARDI G. An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper inerter (TMDI)[J]. Earthquake engineering & structural dynamics,2018,47(5):1169-1192.

[12] CARRELLA A,BRENNAN M J,WATERS T P. Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic[J]. Journal of sound and vibration,2007,301(3/4/5):678-689.

[13] ALAVI B,KRAWINKLER H. Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. [S. l.]:IAEE,2000:2665.

(编辑 李坤璐)